

수리 및 수치모형실험을 이용한 여수로 설계 - 화북다목적댐

Spillway Design by Using Hydraulic and Numerical Model Experiment - Case Study of HwaBuk Multipurpose Dam

김 대 근* / 최 지 웅** / 김 창 시*** / 이 지 원****

Kim, Dae Geun / Choi, Ji Woong / Kim, Chang Si / Lee, Ji Won

Abstract

This study on the HwaBuk Multipurpose Dam showed that two- and three- dimensional numerical model experiments, as well as hydraulic model experiments, can be useful analysis tools for engineers. A commercially available RMA2, which solves the shallow water equations, and FLOW-3D, which solves the Reynolds averaged Navier-Stokes equations, were used to simulate the hydraulic model setup. Numerical simulation results on the following were compared with the hydraulic model results: the flow in the reservoir basin and the approaching channel; the discharge in the overflow weir; the water surface profiles in the rollway, chute, and stilling basin; and the pressure distributions in the rollway. It was shown that there is a reasonably good agreement between the numerical model and the hydraulic model for the most of computations. There were, however, some differences between the numerical simulation results and hydraulic model results for the hydraulic jump in the stilling basin because of air entrainment effect.

keywords : HwaBuk Multipurpose Dam, numerical model, hydraulic model, RMA2, FLOW-3D

요 지

본 연구에서는 화북다목적댐을 대상으로 2차원, 3차원 수치모형실험이 수리모형실험과 더불어 설계자에게 유용한 해석도구로 사용될 수 있음을 보였다. 2차원, 3차원 수치모형으로 천수방정식을 지배방정식으로 하는 RMA2와 RANS를 지배방정식으로 하는 FLOW-3D 모형을 이용하였다. 수몰지역과 접근수로에서의 유황, 월류웨어의 방류능력, 월류부, 도류부, 감세지에서의 수면형상, 월류부에서의 압력분포에 대한 수치모의 결과를 수리모형실험 결과와 비교하였다. 비교 결과, 대부분의 경우에 수치모의 결과는 수리모형실험 결과를 잘 재현하는 것으로 나타났다. 그러나, 감세지에서의 도수현상에 대한 수치모의 결과는 공기연행효과로 인해 수리모형실험 결과와 다소 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 화북다목적댐, 수치모형, 수리모형, RMA2, FLOW-3D

* 목포대학교 토목공학과 전임강사

Lecturer, Dept. of Civil Engineering, Mokpo National Univ., Chonnam, 534-729, Korea
(e-mail: kdg05@mokpo.ac.kr)

** (주)EPS Solution 과장

Sectional Chief, EPS Solution, 757-1, NaeSon-Dong, UiWang-Si, KyungGi-Do, 437-080, Korea

*** (주)대우건설 토목사업본부 차장

Vice Chief, Civil Business Division, DAEWOO E & C, Chung-Gu, Seoul, 100-714, Korea

**** (주)대우건설 토목사업본부 이사

Director, Civil Business Division, DAEWOO E & C, Chung-Gu, Seoul, 100-714, Korea

1. 서 론

댐 여수로와 같은 대규모 수리구조물을 건설하는 경우에는 구조물의 수리학적 안정성과 기능성을 검토하여야 한다. 검토방법은 수리모형실험과 수치모형실험으로 크게 나눌 수 있는데, 흐름이 상류에서 사류로 변하고 정수압이 동수압으로 변환되는 과정에서 부압이 발생하는 등 여수로에서의 동수역학적인 거동이 복잡하기 때문에 지금까지는 수리모형실험이 일반적으로 사용되어 왔다. 수리모형실험은 지형과 구조물의 원형(prototype)을 축소 제작하여 실험적으로 흐름특성을 고찰하는 것으로 모형 제작상의 오류와 축척효과로 인해 발생할 수 있는 오류에 대한 검토가 충분히 이루어진다면 좋은 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 수치모형실험은 물의 흐름을 나타내는 지배방정식과 적절한 경계조건을 수치해석 기법을 통해 컴퓨터로 계산하는 것으로, 최근 들어 컴퓨터의 용량 증대와 계산속도의 향상은 수리구조물에서의 복잡한 동수역학적인 거동의 경제적인 해석을 가능케 하고 있다. 일반적으로 수리모형실험은 수치모형실험에 비해 시간과 비용이 많이 소요된다. 특히, 댐 상류 수몰지구에 대한 유황 검토는 모의구역이 너무 넓어 수리모형실험이 곤란하다. 또한 비용과 시간의 제한이 있는 경우, 원안을 포함한 다양한 대안에 대해 수리모형실험을 이용한 검토는 불가능할 수 있다. 이러한 경우, 설계자에게 수치모형실험은 수리모형실험의 좋은 대안이 될 수 있다. 하지만 수치모형실험을 현장에 적용하는 경우, 모형의 적용한계에 대한 설계자의 이해가 바탕이 되어야 할 것이다.

댐 상류에 형성되는 저수지에서의 흐름거동은 일반적으로 평면 2차원으로 해석하는데, RMA2 모델이 주로 사용되어 왔다. RMA2 모델은 경계처리가 용이한 유한요소 모형으로 남한강 수리모형실험(건설교통부, 1997)과 영월댐 수리모형실험(한국수자원공사, 1997) 등의 연구에 사용된 바 있다.

댐의 월류형 여수로에서의 동수역학적인 해석을 위하여 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation)를 지배방정식으로 하는 3차원 수치모형을 이용하기 시작한 것은 비교적 최근의 일이다(김남일, 2003; 김대근 등, 2004; 김영한 등, 2003; Ho 등, 2001; Olsen과 Kjellesvig, 1998; Savage 등, 2001). Olsen과 Kjellesvig (1998)은 여수로에서의 흐름을 해석하기 위하여 RANS와 $k-\epsilon$ 난류모형을 지배방정식으로 하여 수치모의 하였다. 수면변위와 유량계수에 대한 적절한 수치모의 결과는 여수로에서의 흐름을 해석하는 데에 수치모형이 효과적으로 이용될 수 있음을 보여주었다.

Savage 등(2001)과 Ho 등(2001)은 RANS를 지배방정식으로 하는 상업용 전산유체역학 프로그램인 FLOW-3D를 이용하여 월류형 여수로의 수면변위와 압력분포를 계산하였다. 특히, 여수로의 설계수위에서 벗어난 저수지 수위에 대한 여수로에서의 흐름 해석시, 수치모형을 이용하는 것이 경제성과 정확성의 측면에서 합리적인 검토방법이 될 수 있음을 보여주었다. 김남일(2003)은 FLOW-3D 모형을 이용하여, 여수로의 수리모형실험시 모형의 축척으로 인한 결과의 왜곡에 대해 검토하였다. 검토결과, 대축척에서의 유량 및 유속이 소축척에서의 값보다 일반적으로 크게 나타남을 보였다. 김영한 등(2003)은 FLUENT 모형을 이용하여 여수로 등 방류구조물에서의 수리현상을 모의한 바 있다. 김대근 등(2004)은 월류형여수로에 교각이 설치된 경우에 교각으로 인한 월류흐름의 특성을 고찰한 바 있다.

이상의 연구는 대부분 여수로 월류부에서의 흐름을 국부적으로 모의하거나, 월류유량의 관점에서 모의결과를 해석하는 것이 대부분이다. 즉, 단순화된 표준형 여수로에서의 모의결과에 대한 평가가 대부분을 차지하고 있고, 실제 지형을 재현한 경우에는 월류유량과 같은 제한적인 종속변수의 평가나 정성적인 흐름특성을 해석하는 선에서 그치고 있다. 본 연구에서는 구체적인 설계과정에서 2차원, 3차원 수치모형실험의 결과를 이용하여 설계안을 도출하는 과정을 제시하였다. 또한 도출된 최종 설계안의 수리모형실험 결과를 이용하여 수치모형의 현장 적용성과 한계점을 평가하였다.

2. 연구방법

2.1 적용대상

본 연구의 적용대상은 화북다목적댐으로 건설위치 및 유역도는 그림 1과 같다. 화북댐 지점의 유역면적은 87.5 km²이다. 화북다목적댐 건설사업은 경북 동남부 지역의 장래 예견되는 물 부족을 해결하기 위하여 선정된 수자원개발 지점으로 1998년 12월 기본계획이 수립되었고, 2003년 5월 실시설계가 완료되었으며(한국수자원공사, 2003), 보다 효율적인 설계를 위하여 대안 실시설계가 수행되었다. 본 연구에서는 2003년 5월에 제시된 여수로의 설계안을 원안으로 하고, 대안 실시설계에서 제시된 설계안을 대안으로 정의하였다.

화북댐의 설계를 위한 주요 수리학적 조건은 표 1과 같다. 본 연구에서는 이러한 수리학적 설계 조건에 대해 댐체 및 여수로의 원안과 대안에 대한 수리학적 검토를 수행하였다. 원안에 대해서는 다음에 설명할 수치모형실험을 이용하여 수리학적 거동의 문제점을

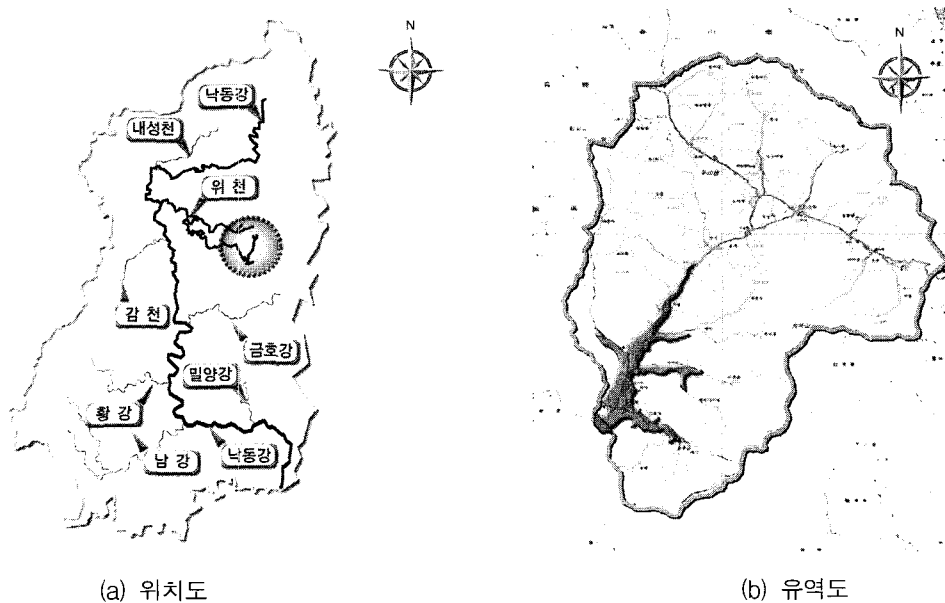


그림 1. 화북다목적댐 위치도 및 유역도

표 1. 화북댐의 주요 수리학적 설계 조건

수위조건	최고수위(MWL)	El. 207.5 m
	홍수위(FWL)	El. 205.1 m
	상시만수위(NHWL)	El. 204.0 m
유량조건	가능최대홍수량(PMF)	1,967 m ³ /sec
	200년빈도 홍수량	586 m ³ /sec

분석하였다. 이를 바탕으로 대안을 수립하고, 대안에 대한 수리모형실험과 수치모형실험을 수행하였다. 특히, 대안에 대한 수리모형실험 결과를 이용하여 수치모의 결과를 검증하고, 수치모형의 현장 적용성과 한계점을 평가하였다.

원안과 대안 여수로의 주요 설계 제원은 표 2와 같다. 그림 2는 원안과 대안 여수로의 종단형을 도시한 것이다. 대안의 도출과정은 이후 3장에서 설명하였다.

2.2 수리모형실험

대안에 대한 수리모형은 1/50 축척으로 일본공영수

리시험장에서 제작하였다. 모형은 댐 상류 200 m, 감세지에서 하류 650 m 지점까지 재현하였다. 제작한 모형의 전경은 사진 1과 같다. 여수로의 접근수로부, 월류부, 도류부, 감세지 등의 구조물은 가공이 비교적 쉬우며, 물과 접촉시에도 팽창하지 않고 수정이 용이한 목재로 제작하였다. 물과 접촉면은 보호 및 조도를 감안하여 페인트를 칠하였다. 여수로의 한쪽 측면은 관측 및 측정을 위하여 투명 아크릴로 제작하였다. 저수지 상류부에 급수장치를 설치한 후 정류판을 설치하여 상류 유입흐름이 정류상태를 유지하도록 하였다. 유량은 사진 2와 같은 자기유량계(magnetic flow meter)를 이

표 2. 여수로의 주요 설계 제원

구분	원안	대안
접근수로 표고	El. 189.0 m	El. 192.0 m
월류웨어 마루 표고	El. 197.2 m	El. 197.2 m
월류웨어 설계수두(Hd)	7.9 m	7.9 m
월류웨어 순폭(Le)	31.5 m (10.5@3)	27.3 m (9.1@3)
도류부 경사	1/50	1/20
감세지 표고	El. 158.0 m	El. 159.0 m
감세지 폭	38.0 m	32.3 m
감세지 길이	54 m	49 m

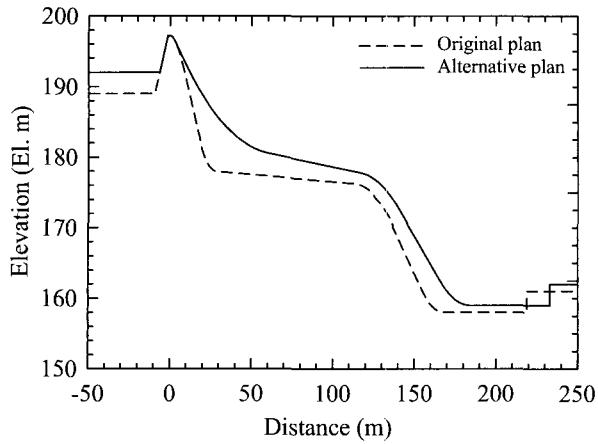


그림 2. 원안과 대안 여수로의 종단형

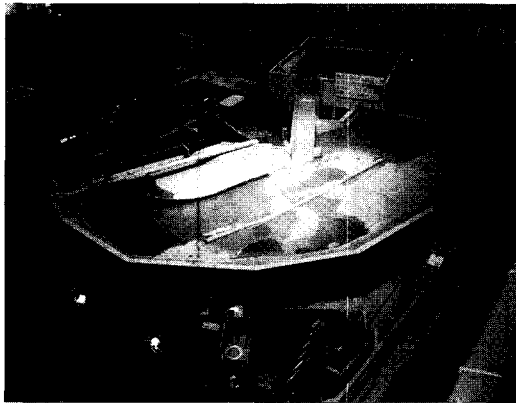


사진 1. 수리모형 전경

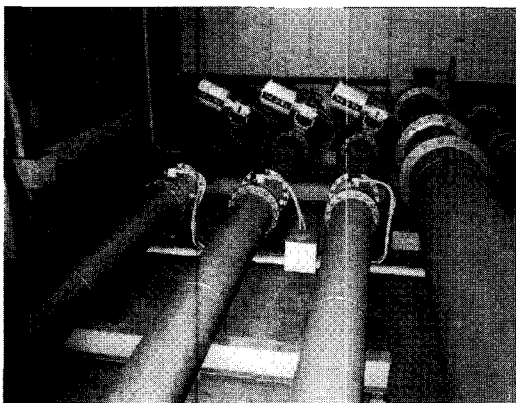


사진 2. 자기유량계

용하여 측정하였으며, 유량검증 결과 0.2% 이내의 오차를 보였다. 저수지의 수위는 사진 3과 같이 마노미터를 설치하고 0.1 mm의 허용오차를 가지는 포인트게이지를 이용하여 측정하였다. 여수로에 작용하는 압력은 사진 4와 같이 마노미터를 이용하여 측정하였다.

2.3 수치모형실험

RMA2 모형은 미공병단에서 1973년에 개발한 이래

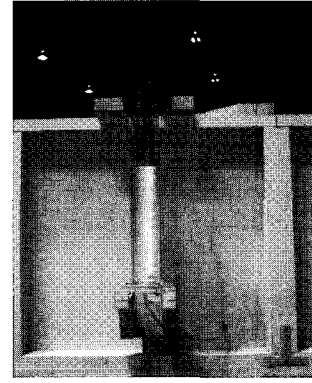


사진 3. 저수지수위 측정용 마노미터

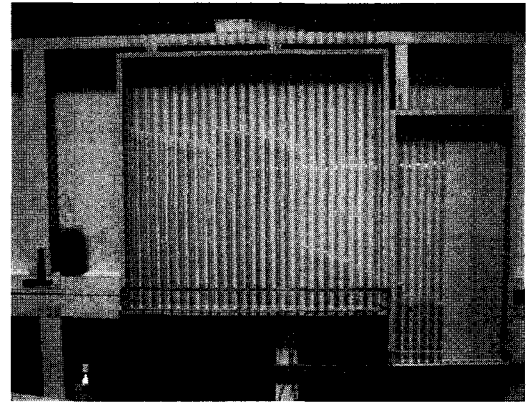


사진 4. 여수로면에 작용하는 압력 측정용 마노미터

하중도, 교각 등을 포함한 하천수로, 저수지, 하구의 수리학적인 해석에 널리 쓰이고 있는 모형으로, 모형의 지배방정식은 수심방향으로 적분한 2차원 천수방정식을 사용한다. 이에 대한 자세한 설명은 김영한 등(2003)에 자세히 기술되어 있다.

비압축성 유체의 흐름을 해석하기 위하여 FLOW-3D에서 사용하는 지배방정식은 직교좌표계(x, y, z)에서의 RANS이다. 물과 공기의 경계인 자유수면을 모델링하기 위하여 VOF (volume of fluid) 함수를 정의하는데, 함수의 값이 1인 경우는 검사체적에 물이 가득한 상태를 의미하고 함수의 값이 0인 경우는 검사체적에 물이 없는 경우를 의미하고 자유수면에서는 함수의 값이 0과 1사이의 값을 가진다. 지배방정식은 유한차분법을 이용하여 이산화되며, 격자계의 구성시 격자망과 지형은 독립적으로 입력되는 FAVOR (Fractional Area and Volume Obstacle Representation) 기법이 사용된다. 이에 대한 자세한 설명은 관련 매뉴얼과 기존 국내, 외 연구자들의 연구를 참조할 수 있다(Flow Science, 2003; 김남일, 2003; 김대근 등, 2004).

3. 실험 및 수치모의 결과

3.1 2차원 수치모의

화북댐으로 인한 수몰지역의 2차원적인 흐름을 모의하였다. 모의구역은 댐 상류 5.6 km까지이며, 이는 홍수위(FWL)로 인해 수몰되는 지역을 모두 포함하는 구간이다. 격자망은 1/5000 수치지도를 기본으로 하고, 금회 측량성과 및 기 수립된 위천 하천정비기본계획(경상북도, 1997)의 측량성과를 이용하여 구성하였다. 경계조건으로 상류는 유량경계조건, 하류는 수위경계조건을 부여하였다. 본 연구에서는 정상상태의 모의를 수행하였으므로, 상류의 유량경계는 여수로에서의 방류량을 기준으로 하였으며, 각 지점에서 유입하는 홍수량은 면적비를 감안하여 유입하는 것으로 가정하였다. 본 연구에서는 시산법을 통해 저수지의 수위가 El. 205.1 m가 되도록 하류의 수위를 변화시키며 모의를 진행하였다. 이상의 방법으로 결정한 하류의 수위경계는 200년 빈도 홍수시 El. 204.59 m인데, 이는 저수지의 홍수위 El. 205.1 m가 여수로에서의 수위가 아니라 저수지에서의 수위이기 때문이다. RMA2 모형의 주 매개변수는 Manning의 조도계수와 와점성계수이다. 저수지와 같이 수심이 깊고 흐름이 약한 경우에는 조도계수에 따른 수위상승이 크지 않으며, 와점성계수의 영향 또한 흐름에 미치는 영향이 미미한 것으로 알려져 있다(김영한 등,

2003). 이에 본 연구에서는 위천 하천정비기본계획(경상북도, 1997)과 김영한 등(2003)의 연구결과를 바탕으로 Manning의 조도계수는 0.04, Peclet 수는 40을 각각 사용하였다.

그림 3과 4는 200년빈도 홍수량에 대한 원안과 대안의 유황을 도시한 것이다. 저수지에서 유속의 크기는 대체로 0.1 m/sec 이내이므로 수몰지역에서의 유황은 대체로 정온한 상태를 유지하고 있다. 하지만 원안의 경우, 댐체와 여수로 교대의 접속부에서 와류가 형성되고 있음을 알 수 있다. 이에 대안에서는 좌안을 기준점으로 원안에 비해 댐체의 축을 반시계방향으로 11.3° 회전하여 계획하였다. 그 결과, 그림 4의 대안에 대한 흐름장에서는 원안에서 관찰되었던 와류가 소멸되었음을 확인할 수 있다.

수몰지역의 유황검토는 재현해야 할 영역이 넓기 때문에 수리모형실험을 수행하는 것이 어렵다. 하지만 본 연구에서와 같이 수치모형을 이용하여 수몰지의 유황을 검토하면, 수몰지역의 유황 뿐 아니라 댐체와 여수로 주변부의 유황을 개선할 수 있는 설계안을 도출하는데 유용하게 이용할 수 있을 것으로 사료된다. 하지만 여수로의 교대부를 지나면서 월류웨어 마루부에 접근하면 흐름은 3차원적인 거동을 보이기 때문에 2차원 천수방정식을 사용하는 RMA2 모형의 결과는 신뢰도가 떨어지게 된다. 따라서 접근수로부를 포함한 여수로에서의 흐름은 3차원 수치모형의 적용이 필요하다.

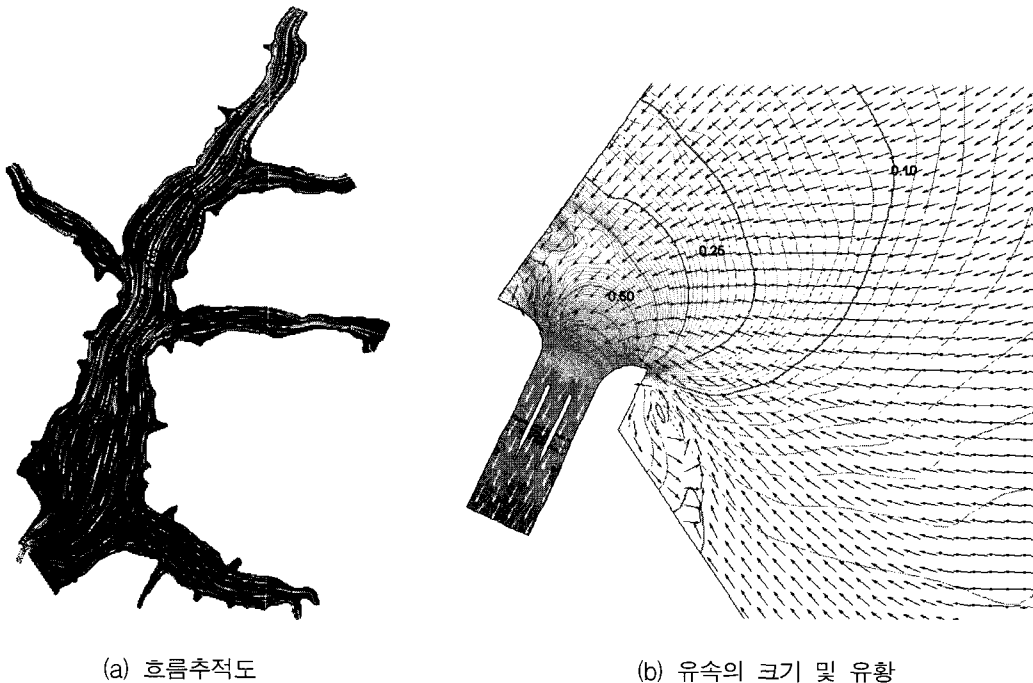
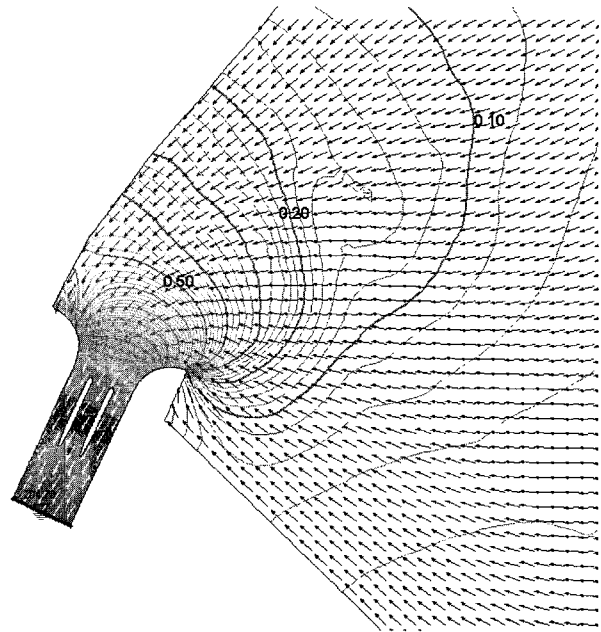


그림 3. 2차원 수치모의 결과(원안)



(a) 흐름추적도



(b) 유속의 크기 및 유향

그림 4. 2차원 수치모의 결과(대안)

3.2 3차원 수치모의

3.2.1 모의조건

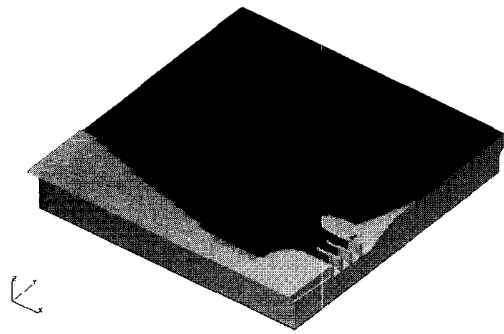
모의를 위한 좌표계는 웨어마루(weir crest)의 중앙부를 x-y평면의 원점으로 잡았으며, 연직좌표계는 표고와 일치하도록 하였다. 3차원 모의는 크게 2종류로 나누어 모델링을 수행하였는데 첫째는 접근수로의 안정성과 웨어의 월류능력을 검토하기 위한 모의(이하 저수지모의)이고 둘째는 여수로의 월류부, 도류부 및 감세지에서의 흐름거동을 검토하기 위한 모의(이하 여수로모의)이다. 모의구간의 범위는 수리모형실험 구간과 일치하도록 하였다. 계산격자는 여수로 부근의 흐름이 급변하는 곳은 격자크기를 작게, 흐름의 변화가 완만한 곳은 격자크기를 크게 하였다. 또한 수렴속도를 빠르게 하기 위하여 처음에는 격자크기를 크게 하여 모의하고, 이를 초기조건으로 하여 세밀한 격자에서 최종 결과를 얻을 수 있도록 하였다. 이를 통해 계산결과의 해상도를 유지하면서 수렴속도를 향상시킬 수 있었다.

저수지모의를 위한 경계조건으로 저수지 상류에서는 수위경계, 하류 여수로에서는 상류에서 유입된 흐름이 반사 없이 유출되는 유출(outflow)경계조건을 이용하였다. 여수로모의를 위한 경계조건으로 상류에서는 저수지모의에서 계산된 결과를 받아서 사용하고, 하류에서는 하류하천의 수위-유량 관계곡선에서 해당 방류량에 대한 수위를 구하여 이를 경계조건으로 이용

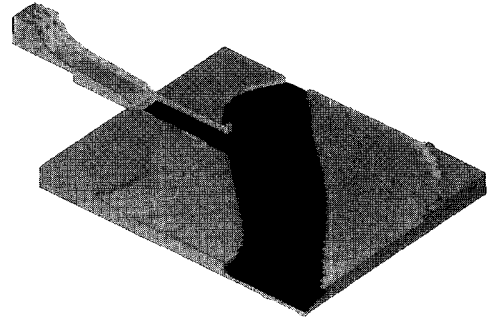
하였다. 물과 접하는 고체면은 벽면경계로 무활(no-slip)경계조건을 이용하였다. 벽면경계의 등가조도(equivalent roughness)는 Chow (1959)와 김대근 등 (2004)의 자료와 연구를 참조하였는데, 콘크리트의 등가조도는 0.305~3.05 mm이며, 자연하천의 등가조도는 30.5~914.4 mm의 범위를 가지는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 콘크리트의 등가조도로 1.0 mm를 채택하였으며, 여수로 이외의 자연지형에는 50 mm의 등가조도를 채택하였다. 모의구간의 상부면은 대칭경계조건을 부여하였으나, 경계면과 물 사이에는 대기압의 공기층이 존재하고 있어, 물의 흐름은 경계조건의 영향을 받지 않는다.

초기조건으로 저수지모의의 경우 여수로 월류마루 상류까지는 상류경계와 동일한 수위를 부여하였으며, 다른 종속변수는 0의 값을 사용하였다. 여수로모의의 초기조건은 저수지모의와 겹치는 부분은 그 결과를 그대로 이용하고, 하류의 초기수위는 하류경계와 동일한 수위를 부여하였으며 다른 종속변수는 0의 값을 사용하였다. 그림 5는 대안 모의를 위한 초기조건을 도시한 것이다.

계산결과의 수렴여부는 흐름의 운동에너지, 난류운동에너지, 유입 및 유출유량의 수렴여부를 이용하여 판단하였다. 본 연구에서는 이상의 수렴조건을 만족하도록 저수지모의는 400초, 여수로모의는 600초 동안 계산한 결과를 이용하여 분석하였다.



(a) 저수지모의



(b) 여수로모의

그림 5. 대안 모의를 위한 초기조건

3.2.2 월류웨어의 방류능력 및 접근수로의 안정성

그림 6은 수문을 완전 개방한 상태에서 월류웨어의 방류능력을 검토한 결과이다. 원안에 대한 수치모의 결과는 월류웨어의 순폭이 설계유량(design discharge)에 비해 과대설계 되었음을 보여주고 있다. 이러한 검토결과를 바탕으로 월류웨어의 순폭을 축소하였으며, 축소한 월류웨어의 방류능력을 수리모형실험 및 수치모형실험을 통해 검토하였다. 수치모의 결과는 수리모형실험의 결과를 잘 재현하고 있음을 보여주고 있다. 즉, 수치모의 결과는 월류웨어의 방류능력을 예측하는데 유용하게 사용될 수 있음을 보여주는 것이다. 그림 6에서 PMF 방류량을 제외하면 모의된 방류량은 설계유량에 비해 큰 값을 보이고 있다. 이는 200년 빈도 유량 등에 대해서는 수문을 부분 개방하는 수문조작을 통해 방류량을 조절하는데, 본 수리모형 및 수치모형을 이용한 모의결과는 수문을 완전 개방한 상태의 유입량과 방류량이 동일한 정상상태의 모의결과이기 때문이다.

PMF 방류량에 대한 대안의 접근수로에서의 유향을 그림 7에 도시하였다. 여수로 좌측 교대부에서 흐름의

원심력으로 인한 수위강하가 관측되나, 그 영향은 미미하고 흐름이 도수로에 진입하면서 그 영향은 거의 소멸되는 것으로 관측되었다. 이는 수치모의 결과에서도 확인할 수 있다. 수치모의 결과에서 걸리는 유속의 크기를 의미한다. 각 수문을 통과하는 방류량을 산정한 결과 큰 편차 없이 1/3 정도의 유량이 각각 방류되고 있음을 확인할 수 있었으며, 최대의 편수위는 흐름이 좌측의 교대부를 돌아 들어오면서 발생하는데, 그 영향은 흐름이 도수로에 진입하면서 소멸되어 좌, 우 대칭의 수면형상을 나타내는 것으로 검토되었다.

3.2.3 여수로에서의 수면형상

그림 8은 원안 도류부에서 수면형상의 수치모의 결과를 도시한 것이다. 원안의 도류부는 그림 2에서 확인했듯이 월류부의 급경사에 비해 상대적으로 완경사 암거로 이루어져 있어, 수면변동이 크게 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 이에 여수로의 중단형을 그림 2의 대안과 같이 수정하였다. 그림 9는 대안에 대한 여수로에서의 수면형상을 도시한 것이다. 실선($Q = 586 \text{ m}^3/\text{sec}$)과 점선($Q = 1,967 \text{ m}^3/\text{sec}$)은 수치모의 결과이고 부호는

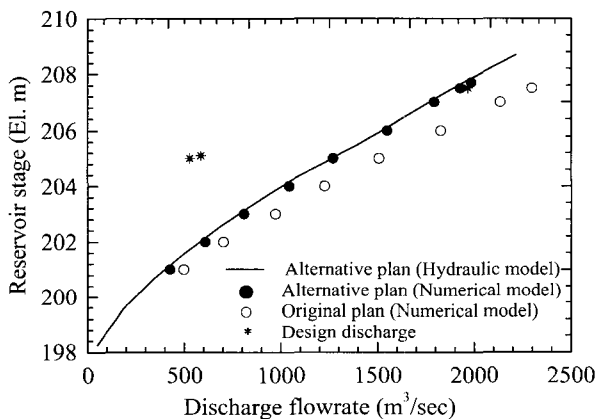


그림 6. 월류웨어의 수위-방류량 관계

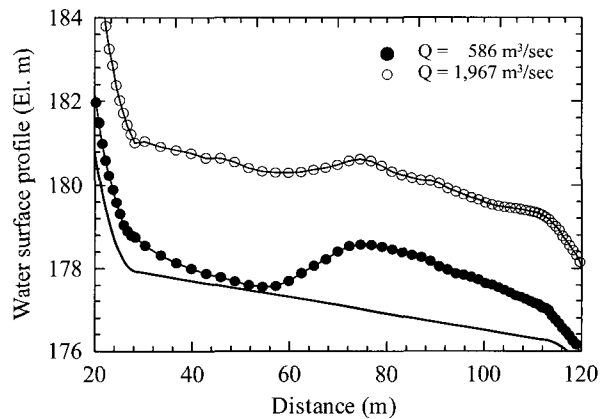
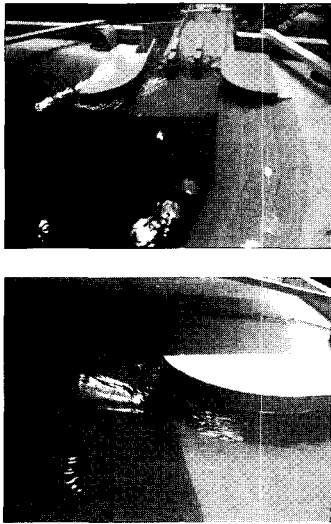
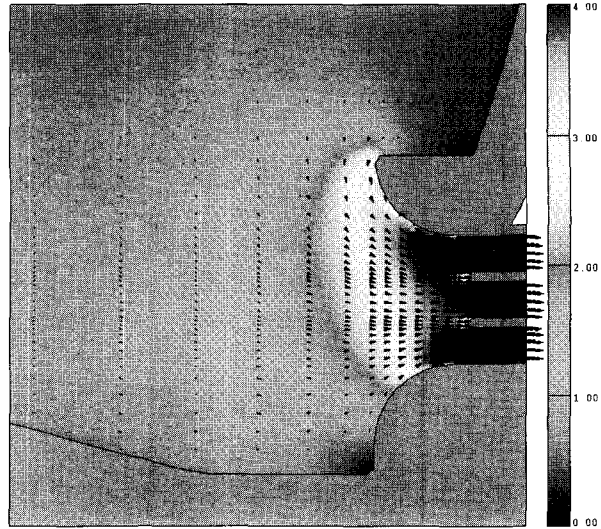


그림 8. 도류부에서의 수면형상(원안)

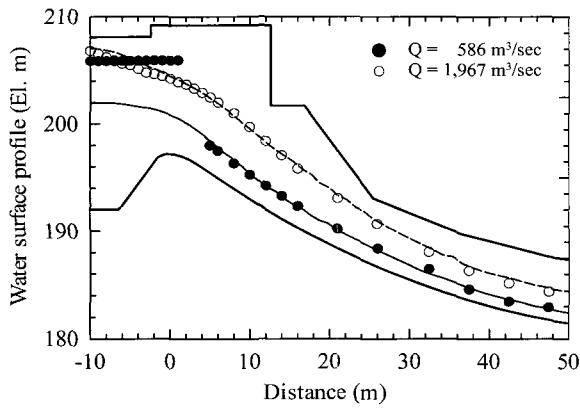


(a) 수리모형실험

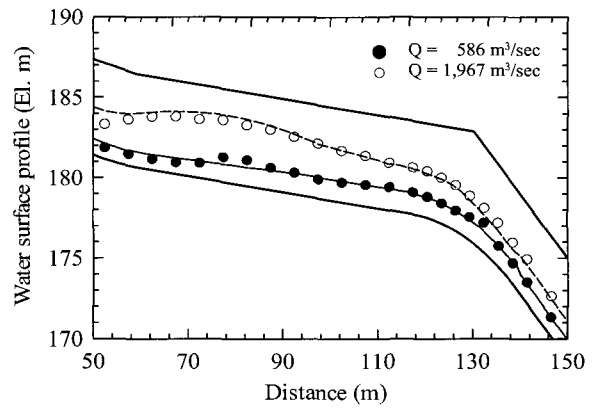


(b) 수치모형실험(단위 : m/sec)

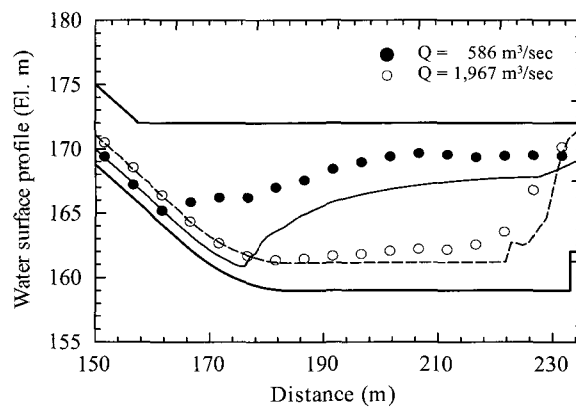
그림 7. 접근수로에서의 유황



(a) 월류부



(b) 도류부



(c) 감세지

그림 9. 여수로에서의 수면형상(대안)

수리모형실험 결과이다. 방류량이 $586 \text{ m}^3/\text{sec}$ 인 경우, 월류부에서 웨어마루 상류의 수리모형실험의 수위가 높

은 것은 저수지수위를 홍수위로 유지한 상태, 즉 수문을 부분 개방한 상태이기 때문이다. 반면에 수치모의

결과는 수문을 완전 개방한 상태의 모의결과이다. 흐름이 웨어마루를 월류하면서 수문으로 인한 수위영향은 급격히 소멸되고 있음을 알 수 있다. 대체로 수치모의 결과는 수리모형실험의 결과를 잘 재현하고 있는데, 특히 도류부에서 상, 하류 경사변화가 수면변동에 미치는 영향을 잘 재현하고 있다. 이러한 결과는 그림 8에 제시한 원안 도류부에서의 수면변동 예측이 타당함을 간접적으로 증명해 주는 것이다. 감세지에서의 수면형상은 도수의 발생여부 및 경향성의 측면에서는 수치모의 결과가 타당한 것으로 판단되나, 도수의 발생위치 및 도수 후 수심의 예측에는 수치모의 결과에 한계가 있음을 보여주고 있다. 그 이유는 감세지에서의 유향을 나타내는 사진 5에서 확인할 수 있다. 흐름이 사류에서 상류로 바뀌면서 에너지를 소산하는 과정인 도수현상은 공기의 연행을 수반한다. 사진 5에서도 확인할 수 있듯이, 감세지에서의 흐름은 물과 공기의 혼합 유체의 흐름이라고 할 수 있는데, 이러한 공기의 연행으로 인해 물의 밀도는 감소하고 수위는 상승하게 된다. 따라서 감세지에서의 도수현상을 재현하기 위해서는 이러한 공기연행 효과를 고려해야 할 것으로 판단된다.

3.2.4 월류부에 작용하는 압력수두

월류부에 작용하는 압력수두는 실제 월류수두가 여수로의 설계수두와 같은 경우에는 대기압이, 실제수두가 설계수두보다 낮은 경우에는 양압이, 높은 경우에는 부압이 발생한다. 부압은 실제 월류수두가 여수로의 설계수두보다 높은 경우, 유선(streamline)의 곡률로 인한 흐름의 원심력에서 기인하는 압력수두가 정수압보다 크기 때문에 발생한다. 과도한 부압은 공동현상 등 구조물에 악영향을 줄 수 있으므로 부압의 발생여부와 그 크기는 면밀히 검토되어야 한다. 그림 10은 월류부에 작용하는 압력수두를 도시한 것이다. 실선($Q = 586 \text{ m}^3$

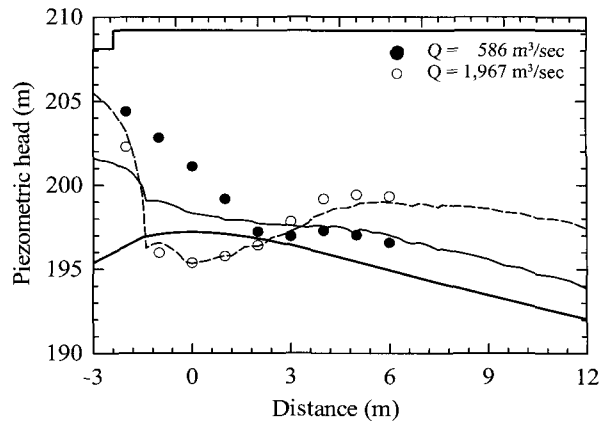
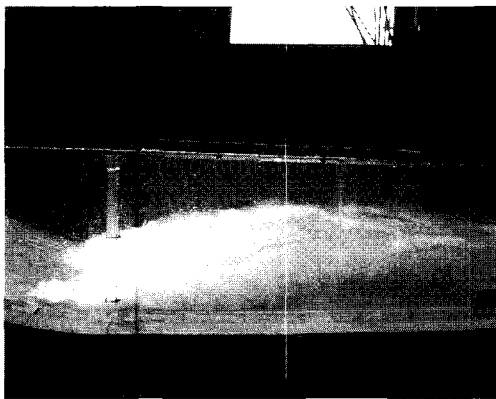


그림 10. 월류부에 작용하는 압력수두(대안)

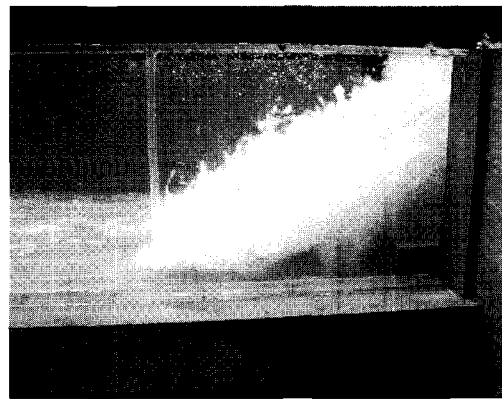
/sec)과 점선($Q = 1,967 \text{ m}^3/\text{sec}$)은 수치모의 결과이고 부호는 수리모형실험 결과이다. 방류량이 $586 \text{ m}^3/\text{sec}$ 인 경우, 웨어마루 상류의 수리모형실험의 압력수두가 수치모의 결과와 다른 이유는 앞에서 언급한 수문의 부분 개방으로 인한 저수지수위의 상승 때문이다. 수리모형실험 조건과 수치모의 조건이 동일한 경우($Q = 1,967 \text{ m}^3/\text{sec}$)에는 수치모의 결과가 수리모형실험의 결과를 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

최근 들어 컴퓨터의 용량증대와 계산속도의 향상은 댐 여수로와 같은 수리구조물에서의 복잡한 수리현상의 해석에 수치모형의 이용을 가능케 하고 있다. 이러한 수치모의는 비용과 시간의 제한이 있는 경우 또는 모든 대안을 수리모형실험을 통해 검토하는 것이 어려운 경우, 설계자에게 수리모형실험의 좋은 대안으로 사용될 수 있다. 하지만 수치모형을 현장에 적용하는 경우, 모형의 적용한계에 대한 설계자의 이해가 바탕이 되어야



(a) 유량 = $586 \text{ m}^3/\text{sec}$



(b) 유량 = $1,967 \text{ m}^3/\text{sec}$

사진 5. 감세지에서의 유향

할 것이다. 예를 들어, 본 연구에서 사용한 3차원 모형은 지배방정식으로 RANS와 난류모형을 사용하기 때문에 계산결과는 난류에 대한 시간평균치이다. 즉, 난류에 의한 순간유속이나 압력변동 등은 계산할 수 없는 것이다. 또한 본 연구에서 사용한 모형은 흐름에 유입되는 공기연행 효과를 고려할 수 없으므로, 공기연행 효과가 증대하는 감세지에서의 도수현상의 정확한 재현에는 한계를 가질 수 밖에 없다.

본 연구에서는 화북다목적댐을 대상으로 2차원, 3차원 수치모의 결과가 수리모형실험 결과와 더불어 설계자에게 실용적인 해석도구로 사용될 수 있음을 보였는데, 본 연구에서 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 수몰지역의 유황검토는 재현해야 할 영역이 넓기 때문에 수리모형실험을 수행하는 것이 어렵다. 본 연구에서는 2차원 수치모의를 통해 수몰지역의 유황 뿐 아니라, 댐체와 여수로 주변부의 유황을 개선할 수 있는 설계안을 도출할 수 있었다.
- 2) 3차원 수치모의의 결과는 월류웨어의 방류능력과 접근수로에서의 유황을 정확히 모의하였다. 3차원 수치모의의 결과를 바탕으로 월류웨어의 순폭을 줄이고 접근수로의 표고를 높여, 경제적인 시공이 가능한 대안을 도출할 수 있었다.
- 3) 3차원 수치모의 결과는 월류부, 도류부의 수면형상을 정확히 모의하였다. 특히, 원안의 도류부는 월류부의 급경사에 비해 상대적으로 완경사 압거로 이루어져 있어, 수면변동이 크게 발생하는 것으로 계산되었다. 이에 수치모의를 통한 검토를 통해 여수로의 중단형을 변경하였다. 감세지에서의 수면형상은 도수의 발생여부 및 경향성의 측면에서는 수치모의 결과가 타당한 것으로 판단되나, 도수의 발생위치 및 도수 후 수심의 정확한 예측에는 수치모의 결과에 한계가 있음을 보여주었다. 이는 본 연구에서 사용한 모형이 감세지에서의 공기연행 효과를 제대로 반영하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.
- 4) 3차원 수치모의 결과는 월류부의 압력분포를 정확히 모의하였다. 특히, 월류수두가 여수로의 설계수두보다 큰 경우에 월류부에서 발생하는 부압의 발생위치와 크기를 정확히 모의할 수 있었다.

본 연구는 향후 댐 여수로와 같은 수리구조물을 설계할 때, 수치모의 결과의 활용범위를 판단하는데 도움

이 될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (1997). **남한강 수리모형실험 보고서**.
- 경상북도 (1997). **위천(준용하천) 하천정비기본계획**.
- 김남일 (2003). *Investigation of scale effects of hydraulic model for dam spillway using 3-D CFD model*. 박사학위논문, 서울대학교.
- 김대근, 이재형, 서일원 (2004). "교각이 설치된 월류형 여수로에서의 흐름에 대한 수치모의." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제5호, pp. 363-373.
- 김영환, 오정선, 서일원 (2003). "수치모형을 이용한 댐 상류 및 여수로 수리현상 해석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 761-776.
- 한국수자원공사 (1997). **영월다목적댐 건설사업 수리모형실험**.
- 한국수자원공사 (2003). **화북다목적댐 건설사업 실시 설계 보고서**.
- 한국수자원학회 (2003). **댐설계기준**.
- Chow, V.T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Company.
- Flow Science (2002). *FLOW-3D (Theory Manual)*, Los Alamos, NM.
- Ho, D.K.H., Boyes, K.M., and Donohoo, S.M. (2001). "Investigation of spillway behavior under increased maximum flood by computational fluid dynamics technique." *14th Australasian Fluid Mechanics Conference*, Adelaide University, Adelaide, Australia.
- Olsen, N.R., and Kjellesvig, H.M. (1998). "Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of spillway capacity." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 36, No. 5, pp. 775-784.
- Savage, B.M., and Johnson, M.C. (2001). "Flow over ogee spillway : Physical and numerical model case study." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 8, pp. 640-649.

(논문번호:04-73/접수:2004.07.26/심사완료:2005.02.21)